Résumé, Bibliographie et Annexes

Balan, Devigny-Chavanne, Hochard, Uzzan, Willaume

Automne 2025

1 Résumé

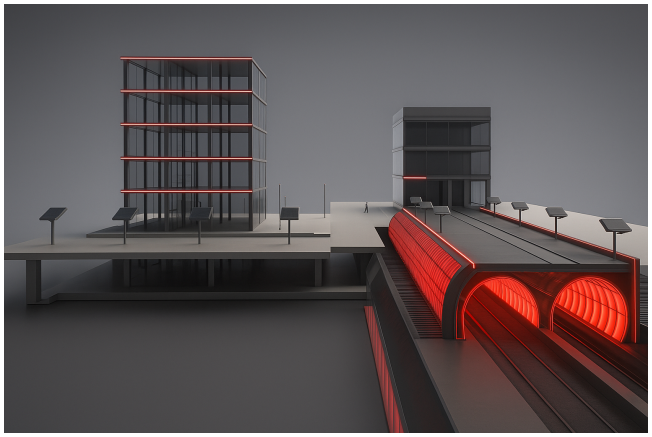

Image générée par l'IA Sora: Modèle théorique d'une station de métro équipée géothermiquement.

Nous avons analysé le potentiel largement inexploité de la chaleur produite dans les tunnels de métro. Dans les bâtiments, le chauffage représente une part importante de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre. Ainsi récupérer la chaleur du métro produite par le déplacement des trains et la présence des usagers apparaît comme une possible source pour répondre à ce besoin de manière renouvelable. L'analyse technique montre qu'il est possible de valoriser cette chaleur grâce à des systèmes de pompes à chaleur (PAC) associées à des panneaux posés sur les parois des tunnels. Les scénarios étudiés montrent un potentiel énergétique important, dépendant de paramètres tels que la densité de chaleur et le coefficient de performance des PAC. Cette solution est difficilement rentabilisée, cependant elle s'intègre facilement en milieu urbain. La production d'énergie est renouvelable et a un faible impact environnemental. Cette technologie fournit une puissance limitée par rapport à la géothermie profonde, mais est plus facile à mettre en place. En conclusion, la récupération de chaleur des métros représente une opportunité durable pour réduire les émissions de gaz à effet de serre des grandes ville, tout en renforçant l'autonomie des quartiers.

2 Bibliographie

[1] Association Française des Professionnels de la Géothermie. *La Géothermie en France: Étude de filière 2021*. Français. Sept. 2021. URL: https://www.geothermies.fr/sites/default/files/inline-files/AFPG_Etude_filie%CC%80re_2021_v10-16092021_0.pdf.

[2] Sofie ten Bosch et al. "Evaluating the geothermal potential of a metro station considering its airflow conditions". In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 163 (Sept. 2025), p. 106697. ISSN: 0886-7798. DOI: 10.1016/j.tust.2025.106697. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779825003359.

[3] Yvon Delerablée et al. "Integration of Thermoactive Metro Stations in a Smart Energy System: Feedbacks from the Grand Paris Project". en. In: *Infrastructures* 3.4 (Dec. 2018), p. 56. ISSN: 2412-3811. DOI: 10.3390/infrastructures3040056. URL: https://www.mdpi.com/2412-3811/3/4/56.

[4] *Enerdrape*. fr-FR. URL: https://enerdrape.com/solution/.

[5] *Energie-Dashboard Bundesamt für Energie*. URL: https://www.dashboardenergie.admin.ch/preise/strom-karte.

[6] Mirika Knuutila et al. “Profitability comparison of active and passive energy efficiency improvements in public buildings”. en. In: *Energy Efficiency* 15.6 (July 2022), p. 38. ISSN: 1570-6478. DOI: 10.1007/s12053-022-10046-9. URL: https://doi.org/10.1007/s12053-022-10046-9.

[7] Duccio Testa et Ludovic Gaudar. “Cas d’étude: ajout d’isolation et d’une pompe à chaleur dans un système de chauffage au mazout”. In: (Sept. 2025).

[8] modolab. *m3 Lausanne*. en-US. Apr. 2023. URL: https://geoeg.net/project/m3-lausanne/.

[9] Office fédéral de l’énergie OFEN. *Bâtiments*. fr. URL: https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/effizienz/gebaeude.html.

[10] Sandrine Perroud. “Engineering heat out of metro tunnels”. en. In: (June 2019). URL: https://actu.epfl.ch/news/engineering-heat-out-of-metro-tunnels/.

[11] Astu Sam Pratiwi and Evelina Trutnevyte. “Review of Life Cycle Assessments of Geothermal Heating Systems”. eng. In: 2021. URL: https://archive-ouverte.unige.ch/unige:132023.

[12] *Prix et Rentabilité des Systèmes de Récupération de Chaleur – Réseau CEE*. fr. URL: https://reseau-cee.fr/solutions/recuperation-chaleur/prix.

[13] *Quel est le rôle du fluide frigorigène dans une pompe à chaleur ?* URL: https://www.saunierduval.fr/particulier/nous-vous-accompagnons/je-m-informe/sur-la-pompe-a-chaleur/quel-est-le-role-du-fluide-frigorigene-dans-une-pompe-a-chaleur/.

[14] *Récupération de chaleur*. fr. URL: https://www.enertime.com/fr/applications/../../index.html.

[15] Jeanne Sauvenier and Alice Di Donna. “Long-term performance of a fully equipped geothermal metro station under operational conditions: monitoring and comprehensive numerical modelling”. In: *Energy and Buildings* 346 (Nov. 2025), p. 116194. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116194. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778825009247.

[16] *Situer sa consommation de chauffage - energie-environnement.ch*. URL: https://www.energie-environnement.ch/economiser-le-chauffage/situer-sa-consommation-de-chauffage.

[17] Swissolar. *fluide caloporteur*. fr. URL: https://www.swissolar.ch/01_wissen/fachwissen/solarwaerme/merkblaetter/caloporteurs-pour-installations-solaires-thermiques.pdf.

[18] Jacopo Zannin et al. “Experimental analysis of a thermoactive underground railway station”. In: *Geomechanics for Energy and the Environment* 29 (Mar. 2022), p. 100275. ISSN: 2352-3808. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gete.2021.100275. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352380821000435.

3 Annexes

3.1 Estimation de la puissance et de l’énergie du système

En considérant les données suivantes :

- Température : $T_{\text{sol}} = 13°\text{C}$ et $T_{\text{air}} = 25°\text{C}$
- Fluide caloporteur : eau + 25% glycol
- capacité thermique $c_p \approx 3,8\text{kJ/kg·K}$
- Densité du fluide : $\rho = 1,02\text{kg/L}$
- Surface des panneaux : $A = 10\text{m}^2$
- Flux surfacique : $q = 25\text{W/m}^2$

La puissance thermique captée par les panneaux est donnée par :
$P = q \cdot A = 25 \times 10 = 250\text{W} = 0,25\text{kW}$

Le débit massique nécessaire pour transporter cette puissance est :
$\dot{m} = \frac{P}{c_p \cdot \Delta T} \approx 5,5\text{g/s}$

Le débit volumique correspondant est :
$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0,0154}{1020} \approx 5,4 \cdot 10^{-6}\text{m}^3\text{/s} \approx 5,4\text{mL/s} \approx 19.5\text{L/h}$

Avec un COP de la PAC d'environ 3, la puissance utile devient :
$P_{\text{utile}} = COP \cdot P = 3 \cdot 0,25 \approx 0.75\text{kW}$

L'énergie produite par jour est donc :
$E_{\text{jour}} = P_{\text{utile}} \cdot t = 0.75 \cdot 24 \approx 18\text{kWh/jour}$

Pour un bâtiment de 350 m^2 en Suisse (consommation post-2016), la consommation annuelle selon les normes SIA estimée est :
$E_{\text{annuel, requis}} = 350 \cdot 19 = \mathbf{6\ 650kWh/an}$

L'énergie produite sur l'année serait :
$E_{\text{annuel, produit}} = 18 \cdot 365 \approx \mathbf{6\ 570kWh/an}$

On pourrait donc chauffer sur l'année, en moyenne et avec de nombreuses simplifications, un bâtiment de 350 m^2 construit après 2016, avec seulement 10m^2 de panneaux.

Remarque : Ce calcul reste théorique, il ne prend pas en compte les variations de températures sur l'année et les pertes. Il suppose des conditions idéales et stables, basées sur les chiffres fournis.

3.2 Estimation de l'efficacité énergétique

Objectif

L'objectif de cette section est d'évaluer les performances énergétiques d'un système d'extraction géothermique basé sur une station de métro, en s'appuyant sur les données collectées dans l'étude de terrain de la station Cleunay [15]. Deux scénarios sont analysés et comparés à l'aide d'un indicateur de retour énergétique (EROI – *Energy Return over (Energy) Invested*).

Sources de données

Un résumé des données est donné dans le Tableau 1.

- Mesures directes présentées dans l'étude de Cleunay (densités d'extraction de chaleur, surfaces actives, débits, propriétés thermiques).
- Hypothèses d'ingénierie explicitées.
- Choix simplifiés de modélisation thermique et hydraulique.

Paramètre	**Scénario 1**	**Scénario 2**	**Justification**
Densité de chaleur (W/m^2) q_{src}	25	25	Valeur moyenne sur les études ([15]), ([2]).
Surface active (m^2) A	1545	2926	Partie ouest vs. surface totale de la géostructure.
COP (-)	3	3	Valeur conservative pour pompes à chaleur géothermiques/métro.
Longeur de tuyau (m) L	50	200	Hypothèse : bâtiment proche vs. bâtiment plus éloigné.
Pertes linéaires (W/m) q_{loss}	2	4	Pertes typiques de conduites isolées : bonne vs. isolation standard.
Durée de vie (années) N_{years}	50	50	Aligné avec la durée de vie des structures civiles.
Heures par an $h_{année}$	8760	8760	Hypothèse d'exploitation continue maximale.
Puissance de pompe (kW) P_{pump}	0.2	0.5	Ordre de grandeur pour un débit d'environ 7 m^3/h.
Énergie intrinsèque de la station (MWh) $E_{emb,station}$	50	80	Énergie estimée pour échangeurs, tuyauterie, installation.
Énergie intrinsèque pour la distribution (MWh) $E_{emb,dist}$	50	120	Énergie estimée pour les conduites externes et travaux civils.

Table 1: Paramètres d'entrée pour les deux scénarios.

Il n'existe pas d'inventaire détaillé du cycle de vie de la rénovation de Cleunay. Par conséquent, nous estimons l'énergie intrinsèque des échangeurs et du réseau de distribution supplémentaires en utilisant une

approche simplifiée d'ordre de grandeur basée sur la littérature relative à l'analyse du cycle de vie des systèmes géothermiques [11]. Les analyses de cycle de vie (ACV) des systèmes géothermiques montrent que la phase de construction (forage, bétonnage, canalisations, pompes à chaleur) représente généralement 10 à 50 % des impacts totaux du cycle de vie pour les systèmes équipés de pompes à chaleur, selon la profondeur et la longueur des canalisations. Pour les réseaux de chaleur urbains, les longs réseaux de transport et les puits peuvent même représenter la part prépondérante des impacts. Par exemple, dans le projet géothermique industriel de Rittershoffen, plus de la moitié des émissions de CO_2 sur l'ensemble du cycle de vie proviennent de la construction des puits et des canalisations de surface. En supposant qu'un bâtiment relié à une station de métro consomme environ 1000 à 2000 MWh de chaleur sur 50 ans, une part de seulement 2 à 5 % de l'énergie primaire totale consommée par la construction sur l'ensemble du cycle de vie correspond déjà à plusieurs dizaines de MWh. Sur cette base, nous adoptons des valeurs de même ordre de grandeur, de 50 à 80 MWh pour la station et de 50 à 120 MWh pour le réseau de distribution externe.

Procédure de calcul

Puissance thermique extraite

La puissance brute disponible à la station de métro est :

$$Q_{\text{src}} = \frac{q_{\text{src}}\, A}{1000} \quad [\text{kW}]$$

Les pertes thermiques dans les tuyaux enterrées sont estimées par :

$$Q_{\text{loss}} = \frac{2L\, q_{\text{loss}}}{1000}$$

La puissance nette récupérable est donc :

$$Q_{\text{avail}} = Q_{\text{src}} - Q_{\text{loss}}$$

Contribution de la pompe à chaleur

En supposant un COP constant :

$$Q_{\text{out}} = Q_{\text{avail}} \frac{\text{COP}}{\text{COP} - 1}$$

$$P_{\text{HP}} = \frac{Q_{\text{out}}}{\text{COP}}$$

L'énergie annuelle et l'énergie sur la durée de vie deviennent :

$$E_{\text{annual}} = Q_{\text{out}} \frac{h_{\text{année}}}{1000} \quad [\text{MWh}]$$

$$E_{\text{life}} = E_{\text{annual}} N_{\text{years}}$$

Énergie de pompage et énergie intrinsèque

Électricité consommée par la pompe :

$$E_{\text{pump,life}} = P_{\text{pump}} \frac{h_{\text{année}}}{1000} N_{\text{years}} \qquad [\text{MWh}]$$

Énergie intrinsèque totale :

$$E_{\text{emb}} = E_{\text{emb,station}} + E_{\text{emb,dist}}$$

EROI

Deux définitions de l'EROI sont utilisées :

EROI brut

Cette version considère toute l'électricité consommée par la pompe à chaleur comme de l'énergie investie :

$$\text{EROI}_{\text{brut}} = \frac{E_{\text{life}}}{E_{\text{emb}} + E_{\text{pump,life}} + E_{\text{HP,life}}}$$

Nous interprètons le système de chauffage comme une source d'énergie, ce qui pénalise fortement les pompes à chaleur.

EROI du système métro

Cette version évalue uniquement le sous-système de récupération de chaleur du métro :

$$\text{EROI}_{\text{metro}} = \frac{E_{\text{life}}}{E_{\text{emb}} + E_{\text{pump,life}}}$$

L'électricité de la pompe à chaleur n'est pas incluse, car elle serait en tout cas nécessaire dans tous les systèmes alternatifs (ex. pompe à chaleur air/eau).

Résultats et Conclusion

Les calculs sont reproduites ci-dessous dans les Tableaux 1 et 2.

Output	Scenario 1	Scenario 2
Q_src_kW	38.6	73.2
pipe_losses_kW	0.2	1.6
Q_avail_kW	38.4	71.6
Q_out_kW	57.6	107.3
HP_electric_kW	19.2	35.8
annual_heat_MWh	504.9	940.2
lifetime_heat_MWh	25245.2	47008.4
annual_HP_MWh	168.3	313.4
lifetime_HP_MWh	8415.1	15669.5
annual_pump_MWh	1.8	4.4
lifetime_pump_MWh	87.6	219.0
total_embodied_MWh	50.2	80.5
total_invested_MWh	8552.9	15969.0
EROI_brut	3.0	2.9
EROI_metro	183.2	157.0

Table 2: Outputs pour les deux scénarios.

Le Scénario 1 correspond à la partie ouest de Cleunay et à un bâtiment voisin. Le Scénario 2 utilise la station entière et un bâtiment plus éloigné.

Nous concluons que l'EROI brut est très faible, reflétant le fait que la pompe à chaleur consomme beaucoup plus d'électricité que la chaleur directement extraite du métro. L'EROI métro est plus pertinent pour comparer des solutions de récupération de chaleur et pour évaluer l'intérêt réel de connecter un bâtiment à une station souterraine.

3.3 Cas d'étude: Ajout d'isolation et d'un système de pompe à chaleur dans une maison chauffée au mazout

Pour le calcul du CO_2 non émis par an, nous avons utilisé les données récapitulées dans le tableau 3.

Quantités	Valeurs	Unités
Production d'énergie avec le mazout	3.76E+07	J/L
Production de CO_2 avec le mazout	3.10E+02	kg/L
taxe de compensation CO_2	1.20E+02	chf/tonne
Coût du mazout	1.60E+02	chf/L
Volume de la maison	8.00E+02	m^3
Aire au sol	1.60E+02	m^2
Épaisseur des murs en béton	2.00E-01	m
Conductivité thermique du béton	8.00E-01	J/smK
Epaisseur des panneaux de polyuréthane	2.00E-01	m
Conductivité thermique du polyuréthane	2.00E-02	J/smK
Temperature dans la maison	2.00E+01	C
Temperature en dehors de la maison	0.00E+00	C
Coût fixe pour le travail	2.00E+04	chf
Coût du polyuréthane	2.00E+03	chf/m^3
Taux d'actualisation	3.00E+00	%
Nombre de jour en hiver pendant lesquels le chauffage fonctionne	1.00E+02	days
Efficacité de la pompe à chaleur	4.00E+00	adim

Table 3: Hypothèses et données de base.

Les formules sur lesquelles s'appuient les calculs sont:

Transfert d'énergie par conduction :

$$Q = \Delta t \cdot k_{\text{cond}} \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{l}$$

Conductivité équivalente de conducteurs thermiques en série :

$$\frac{k_{\text{eq}}}{l_a + l_b} = \left(\frac{l_a}{k_a} + \frac{l_b}{k_b} \right)^{-1}$$

Pour le cas particulier où $l_a = l_b$:

$$k_{\text{eq}} = 2 \left(k_a^{-1} + k_b^{-1} \right)^{-1}$$

Cette expression est valable lorsque les épaisseurs sont identiques (l'épaisseur totale est doublée, d'où le facteur 2).

Valeur future :

$$VF = V_0 \cdot (1 + r)^{\text{temps}}$$

Les résultats du cas d'étude sont presentés dans la Fig. 1.

Quantity	Value	Unit		
Total investment cost - insulation & heat pump	1.33E+05	chf		
Savings on oil cost per year (no CO2 tax)	1.21E+04	chf		
Savings on oil cost per year (with CO2 tax)	1.49E+04	chf		
CO2 savings per year	2.34E+04	kg		
ECONOMIC ANALYSES WITHOUT CO2 TAX				
YEAR	**Future value of investment (chf)**	**Savings on oil cost (chf) (no CO2 tax)**	**Net savings (chf) (no CO2 tax)**	**CO2 savings (kg)**
1	1.37E+05	1.21E+04	-1.25E+05	2.34E+04
2	1.41E+05	2.45E+04	-1.16E+05	4.67E+04
3	1.45E+05	3.73E+04	-1.08E+05	7.01E+04
4	1.49E+05	5.04E+04	-9.88E+04	9.35E+04
5	1.54E+05	6.40E+04	-8.97E+04	1.17E+05
6	1.58E+05	7.80E+04	-8.03E+04	1.40E+05
7	1.63E+05	9.24E+04	-7.07E+04	1.64E+05
8	1.68E+05	1.07E+05	-6.07E+04	1.87E+05
9	1.73E+05	1.23E+05	-5.05E+04	2.10E+05
10	1.78E+05	1.38E+05	-4.00E+04	2.34E+05
11	1.84E+05	1.54E+05	-2.91E+04	2.57E+05
12	1.89E+05	1.71E+05	-1.79E+04	2.80E+05
13	1.95E+05	1.88E+05	-6.40E+03	3.04E+05
14	2.01E+05	2.06E+05	**5.47E+03**	3.27E+05
15	2.07E+05	2.24E+05	**1.77E+04**	3.50E+05
16	2.13E+05	2.43E+05	**3.03E+04**	3.74E+05
17	2.19E+05	2.62E+05	**4.33E+04**	3.97E+05
18	2.26E+05	2.82E+05	**5.66E+04**	4.21E+05
19	2.33E+05	3.03E+05	**7.04E+04**	4.44E+05
20	2.39E+05	3.24E+05	**8.45E+04**	4.67E+05
ECONOMIC ANALYSES WITH CO2 TAX				
YEAR	**Future value of investment (chf)**	**Savings on oil cost (chf) (with CO2 tax)**	**Net savings (chf) (with CO2 tax)**	**CO2 savings (kg)**
1	1.37E+05	1.49E+04	-1.22E+05	2.34E+04
2	1.41E+05	3.02E+04	-1.11E+05	4.67E+04
3	1.45E+05	4.59E+04	-9.90E+04	7.01E+04
4	1.49E+05	6.22E+04	-8.71E+04	9.35E+04
5	1.54E+05	7.89E+04	-7.48E+04	1.17E+05
6	1.58E+05	9.61E+04	-6.22E+04	1.40E+05
7	1.63E+05	1.14E+05	-4.92E+04	1.64E+05
8	1.68E+05	1.32E+05	-3.58E+04	1.87E+05
9	1.73E+05	1.51E+05	-2.20E+04	2.10E+05
10	1.78E+05	1.70E+05	-7.82E+03	2.34E+05
11	1.84E+05	1.90E+05	**6.81E+03**	2.57E+05
12	1.89E+05	2.11E+05	**2.19E+04**	2.80E+05
13	1.95E+05	2.32E+05	**3.74E+04**	3.04E+05
14	2.01E+05	2.54E+05	**5.34E+04**	3.27E+05
15	2.07E+05	2.76E+05	**6.98E+04**	3.50E+05
16	2.13E+05	3.00E+05	**8.68E+04**	3.74E+05
17	2.19E+05	3.23E+05	**1.04E+05**	3.97E+05
18	2.26E+05	3.48E+05	**1.22E+05**	4.21E+05
19	2.33E+05	3.73E+05	**1.41E+05**	4.44E+05
20	2.39E+05	3.99E+05	**1.60E+05**	4.67E+05

Figure 1: Résultats du cas d'étude.

3.4 Justification des estimations de coûts

Selon les données publiées pour le *projet Grand Paris*, la mise en place d'un système de récupération de chaleur intégré directement lors de la construction du métro représente un investissement d'environ **500 000 CHF** pour la seule partie système de récupération .

En ajoutant le coût d'une pompe à chaleur—estimé entre **100 000 et 500 000 CHF** selon les fourchettes du Réseau CEE—ainsi que les coûts de raccordement hydraulique, il apparaît cohérent que l'investissement total pour une installation en **construction neuve** se situe entre **1,2 et 2,5 millions CHF**.

Pour un projet **rétrofit**, les coûts augmentent sensiblement en raison des contraintes supplémentaires : adaptation aux infrastructures existantes, travaux sur mesure, accès restreints, exigences de sécurité accrues et éventuelles interruptions du trafic. Nous retenons ainsi une fourchette plus large, avec un plafond fixé à **4 millions CHF**, en cohérence avec le coût du projet *Bunhill Heat Network* à Londres (District of Islington), un exemple comparable mais de plus grande envergure.

Estimation de l'amortissement

Pour le scénario 1, nous considérons un investissement initial de CapEx = 1.2 millions CHF et un COP de la pompe à chaleur fixé à 3.

Énergie utile récupérable L'énergie thermique nette extraite du tunnel est estimée selon :

$$E_{\text{utile}} = q_{\text{src}} \times A - q_{\text{loss}} \times L$$

avec :

$$q_{\text{src}} = 25\,\text{W/m}^2, \quad A = 1545\,\text{m}^2, \quad q_{\text{loss}} = 2\,\text{W/m}, \quad L = 50\,\text{m}.$$

D'où :

$$E_{\text{utile}} = 25 \times 1545 - 2 \times 50 = 38\,525\,\text{W}.$$

Converti en énergie annuelle :

$$E_{\text{utile,an}} = 38.525\,\text{kW} \times 8760\,\text{h/an} = 337\,500\,\text{kWh/an}.$$

Coût d'opération annuel En considérant un prix de l'électricité de 125 CHF/MWh, le coût d'opération est :

$$\text{OpEx} = 337\,500\,\text{kWh/an} \times 0.125\,\text{CHF/kWh} = 40\,000\,\text{CHF/an}.$$

Économie annuelle La PAC (COP = 3) permet de produire :

$$E_{\text{PAC}} = E_{\text{utile}} \times \text{COP}.$$

En considérant un coût équivalent au mazout d'environ 100 CHF/MWh, l'économie nette est :

$$\text{Économie} = 100\,000 - 40\,000 = 60\,000\,\text{CHF/an}.$$

Amortissement simple (sans actualisation)

$$T_{\text{simple}} = \frac{\text{CapEx}}{\text{Économie}} = \frac{1\,200\,000}{60\,000} = 20\,\text{ans}.$$

Amortissement actualisé Les résultats détaillés figurent dans la Fig. 2.

I	J	K	L	M	N	O	P
Années	Actualisation		Années	Actualisation			
1	57142,8571		26	16874,4441		Total	1095355,53
2	54421,7687		27	16070,8991			
3	51830,2559		28	15305,6182			
4	49362,1485		29	14576,7793			
5	47011,57		30	13882,6469			
6	44772,9238		31	13221,5685			
7	42640,8798		32	12591,97			
8	40610,3617		33	11992,3524			
9	38676,535		34	11421,288			
10	36834,7952		35	10877,4171			
11	35080,7573		36	10359,4449			
12	33410,2451		37	9866,13798			
13	31819,281		38	9396,32188			
14	30304,0772		39	8948,87798			
15	28861,0259		40	8522,74094			
16	27486,6913		41	8116,89613			
17	26177,8013		42	7730,37727			
18	24931,2393		43	7362,26406			
19	23744,0374		44	7011,68006			
20	22613,369		45	6677,79053			
21	21536,5419		46	6359,80051			
22	20510,9923		47	6056,95287			
23	19534,2783		48	5768,52654			
24	18604,0746		49	5493,8348			
25	17718,1663		50	5232,22362			

Figure 2: L'amortissement actualisé calculé via une actualisation annuelle.